

## Исследование динамических характеристик планетарного початкоотделяющего аппарата

Владимир Макичевич Погосян<sup>1</sup>,  
кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: pogosyn@gmail.com;

Михаил Евгеньевич Чаплыгин<sup>2</sup>,  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
e-mail: misha2728@yandex.ru

<sup>1</sup>Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, г. Краснодар, Российская Федерация;

<sup>2</sup>Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

**Реферат.** Предложили методический подход, применяемый для расчета планетарного початкоотделяющего аппарата, используемого в кукурузоуборочных комбайнах и специализированных жатках. Исследовали динамические характеристики работы планетарного початкоотделяющего аппарата. Выявили, что задачи исследования динамики машин весьма разнообразны из-за сложности происходящих в них динамических процессов. Особое значение приобретают теоретические методы исследования, позволяющие установить закономерности движения машинного агрегата еще в процессе проектирования. (*Цель исследования*) Предложить методику определения основных кинематических и динамических параметров работы вертикального початкоотделяющего аппарата. (*Материалы и методы*) Изучили методические подходы и применяемые математические аппараты для определения основных кинематических и динамических параметров работы вертикального початкоотделяющего аппарата, рассмотрели схему однобарабанного планетарного початкоотделяющего аппарата кукурузоуборочного комбайна и составили дифференциальное уравнение движения. (*Результаты и обсуждение*) После поэтапного математического расчета с применением предложенного методического подхода для исследования динамических характеристик, происходящих в процессе работы планетарного початкоотделяющего аппарата, получили уравнения: запуска аппарата на холостом ходу; запуска аппарата с нагрузкой; подачи стеблей после запуска аппарата; внезапного прекращения подачи. В ходе лабораторных исследований определили, что початкоотделяющий аппарат показал наибольший эффект при угловой скорости барабана в пределах 52,1-62,2 радиана в секунду. (*Выводы*) Рассмотрели четыре режима работы початкоотделяющего аппарата кукурузоуборочного комбайна и получили их уравнения. Построили схему вертикального початкоотделяющего аппарата. Предложили методический подход и алгоритм расчета основных динамических и кинематических показателей работы вертикального початкоотделяющего аппарата.

**Ключевые слова:** уборка кукурузы на зерно, отделение початков, кукурузоуборочный комбайн, планетарный початкоотделяющий аппарат, методика расчета параметров, динамические характеристики.

**Для цитирования:** Погосян В.М., Чаплыгин М.Е. Исследование динамических характеристик планетарного початкоотделяющего аппарата // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. №3. С. 41-47. DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-3-41-47.

## Research into the Dynamic Characteristics of the Planetary Cob-Separating Device

Vladimir M. Pogosyan<sup>1</sup>,  
Ph.D.(Eng.), associate professor,  
e-mail: pogosyn@gmail.com;

Mikhail E. Chaplygin<sup>2</sup>,  
Ph.D.(Eng.), senior researcher,  
e-mail: misha2728@yandex.ru

<sup>1</sup>Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russian Federation;

<sup>2</sup>Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** In the article, the authors propose a methodological approach to calculating the planetary cob-separating device used in corn harvesters and specialized headers. The dynamic characteristics of the planetary cob-separating device operation were investigated. The authors found out that the machine dynamics research problems are rather diverse due to the complexity of the dynamic processes occurring in them. The theoretical research methods prove to be of particular importance, since they make it

possible to define the laws of machine unit motion, even at the stage of designing the planetary cob-separating device. (*Research purpose*) To propose a method for calculating the main kinematic and dynamic parameters of the vertical cob-separating device operation. (*Materials and methods*) The authors studied the methodological approaches and mathematical tools used to determine the main kinematic and dynamic parameters of the vertical cob-separating device operation; examined the scheme of a single-drum planetary cob-separating device in a corn harvester and built a differential equation of motion. (*Results and discussion*) After a step-by-step mathematical calculation with the use of the proposed methodological approach to studying the dynamic characteristics arising during the planetary cob-separating device operation, the following equations were obtained: starting the device at idle; starting the device with a load; feeding stems after starting the device; sudden interruption of the supply. When conducting the laboratory studies, it was determined that the cob-separating device showed the greatest effect at an angular speed of the drum within the range of 52.1-62.2 radians per second. (*Conclusions*) The authors considered four modes of the cob-separating device operation in a corn harvester and obtained the equations for them. The authors created a diagram of the vertical cob-separating device and proposed a methodological approach and an algorithm for calculating the main dynamic and kinematic indicators of its operation.

**Keywords:** harvesting corn for grain, cob separation, corn harvester, planetary cob separator, method of calculating parameters, dynamic characteristics

**For citation:** Pogosyan V.M., Chaplygin M.E. Issledovanie dinamicheskikh harakteristik planetarnogo pochatkootdelyayushchego apparata [Research into the dynamic characteristics of the planetary cob-separating device]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2021. Vol. 15. N3. 41-47 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-3-41-47.

Одной из основных задач Федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства на 2017-2025 годы, согласно Постановлению Правительства РФ от 25 августа 2017 г. № 996, предусмотрено создание и внедрение современных технологий возделывания сельхозкультур, в том числе и кукурузы на зерно или в початках [1]. Кукурузоуборочные комбайны работают по одной технологической схеме: отрывают початки, очищают их от оберток и подают в прицепленную сзади тележку [2-4]. Стебли срезаются, измельчаются и подаются в идущий рядом транспорт. Собранные и очищенные от оберток початки привозят на ток, перебирают, удаляя незрелые и пораженные болезнями, высушивают до влажности 16-18% и закладывают на хранение в сетчатые сапки или другие хранилища, предназначенные для длительного хранения, согласно требованиям ГОСТ 13634-90.

При уборке на зерно на комбайн навешивают специальную кукурузную приставку и переоборудуют специальным комплектом рабочих органов в соответствии с рекомендациями завода-изготовителя для уборки кукурузы на зерно [5]. Технологическая схема работы предусматривает отрыв початков и подачу их в молотильный аппарат комбайна для обмола и одновременное измельчение пожнивных остатков находящимися под приставкой ножами [6, 7].

Анализ известных устройств, используемых в конструкциях кукурузоуборочных комбайнов, предназначенных для отделения початков от стеблей выявил существенные недостатки в выполнении технологического процесса: высокие энергозатраты и большую повреждаемость початков. При проектировании и исследовании конструкций таких комбайнов в качестве

рабочих органов все больше применяют планетарные аппараты [8, 9].

**Цель исследования** – определение основных кинематических и динамических параметров работы вертикального початкоотделяющего аппарата.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** Рассмотрим схему однобарабанного планетарного початкоотделяющего аппарата кукурузоуборочного комбайна (рис. 1) [10]. Он состоит из планетарного барабана  $\delta$ , вальцов  $b$ , гладкого барабана  $d$ , стеблепротягивающих вальцов  $e_1, e_2$ , стеблеподающих цепей  $f_1, f_2$ , Источники энергии – двигатель. Передаточный механизм состоит из колес  $1, 2, 3, 4, 5, 6$ , солнечного колеса  $S$ , сателлитов и цепочных контуров  $I, II, III$  (патент №2690794 С1, 2019).

Обозначим как  $\tau_\delta, \tau_s, \tau_c, \omega_\delta, \omega_s, \omega_c$  радиусы и угловые скорости барабана, солнечной шестерни и сателлитного колеса;  $O_s, O_\delta, O_c$  – центры солнечной шестерни, барабана и сателлита. Центры  $O_s$  и  $O_\delta$  совпадают.  $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5, \tau_6, \omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6$  – радиусы и угловые скорости колес  $1, 2, 3, 4, 5, 6$ .

Угловые скорости  $\omega_\delta, \omega_s, \omega_c$  можем выразить через угловую скорость вала двигателя [11]:

$$\begin{aligned}\omega_\delta &= \omega_1 \frac{\tau_1}{\tau_2} = i_{21} \omega_1; \\ \omega_s &= \omega_1 \frac{\tau_3}{\tau_4} = i_{43} \omega_1; \\ \omega_d \omega_\delta \frac{\tau_5}{\tau_6} &= i_{21} i_{65} \omega_1,\end{aligned}\quad (1)$$

где  $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5, \tau_6$  – радиусы колес  $1, 2, 3, 4, 5, 6$ , м;  $\omega_1$  – угловая скорость первого (1) колеса, рад/с;  $i_{21}, i_{65}, i_{43}$  – передаточные числа колес.

Сателлиты, кроме относительного вращения вокруг своих осей, имеют еще и переносное вращение

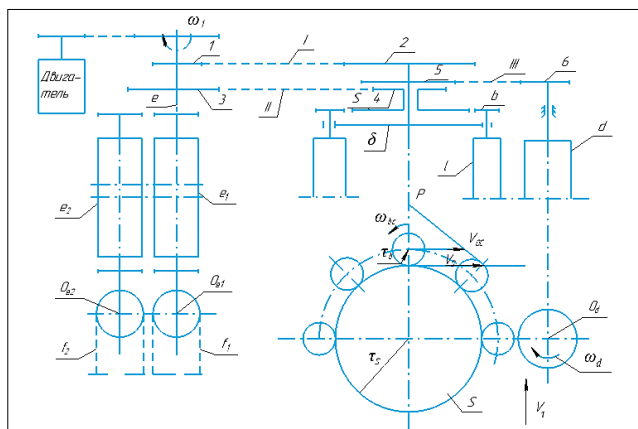


Рис. 1. Схема вертикального початкоотделяющего аппарата: 1-6 – колеса передаточного механизма; δ – планетарный барабан; b – вальцы; S – солнечное колесо; τ<sub>δ</sub>, τ<sub>s</sub>, τ<sub>c</sub> – радиусы барабана; ω<sub>δ</sub>, ω<sub>s</sub>, ω<sub>c</sub> – угловые скорости барабана; I, II, III – сателлиты и цепочные контуры; e<sub>1</sub>, e<sub>2</sub> – стеблепротягивающие вальцы; f<sub>1</sub>, f<sub>2</sub> – стеблеподающие цепи; O<sub>s</sub>, O<sub>δ</sub>, O<sub>c</sub> – центры солнечной шестерни, барабана и сателлита; d – гладкий барабан

Fig. 1. Diagram of the vertical cob-separating device: 1-6 – gear wheels; δ – planetary drum; b – rollers; S – sun wheel; τ<sub>δ</sub>, τ<sub>s</sub>, τ<sub>c</sub> – drum radii; ω<sub>δ</sub>, ω<sub>s</sub>, ω<sub>c</sub> – drum angular velocities; I, II, III – satellites and chain loops; e<sub>1</sub>, e<sub>2</sub> – stem-pulling rollers; f<sub>1</sub>, f<sub>2</sub> – stalk feeding chains; O<sub>s</sub>, O<sub>δ</sub>, O<sub>c</sub> – sun gear centers, drum and satellite; d – smooth drum

вместе с осями. Учитывая это, запишем выражение для окружной скорости точки контакты колес S и C:

$$V_c = V_s - V_{OS},$$

где V<sub>c</sub> и V<sub>s</sub> – окружные скорости точек обода сателлита и солнечной шестерни, м/с; V<sub>OS</sub> – скорость центра сателлита, м/с.

Тогда:

$$\tau_c \omega_c = \tau_s \omega_s - (\tau_c + \tau_s) \omega_\delta,$$

где τ<sub>δ</sub>, τ<sub>s</sub>, τ<sub>c</sub> – радиусы барабанов, м;

ω<sub>δ</sub>, ω<sub>s</sub>, ω<sub>c</sub> – угловые скорости барабанов, рад/с.

Отсюда:

$$\omega_c = \frac{\tau_s}{\tau_c} \omega_s - \left(1 + \frac{\tau_s}{\tau_c}\right) \omega_\delta.$$

После несложных преобразований получаем выражение для угловой скорости сателлита:

$$\omega_c = [i_{CS} i_{43} - i_{21} (1 + i_{CS})] \omega_1 \quad (2)$$

где ω<sub>1</sub> – угловая скорость первого колеса (1), рад/с;

i<sub>CS</sub>, i<sub>43</sub>, i<sub>21</sub> – передаточные числа колес.

Кинетическую энергию аппарата, Дж, определим следующим образом:

$$T = \frac{1}{2} \left[ (J_{e1} + J_{e2}) \omega_1^2 + J_d \omega_d^2 + J_s \omega_s^2 + J_\delta \omega_\delta^2 + n J_c \omega_c^2 + n m_b (\tau_c + \tau_s)^2 \omega_\delta^2 + (m_{f1} + m_{f2}) \tau_o^2 \omega_1^2 + m_{I1} \tau_1^2 \omega_1^2 + m_{II} \tau_2^2 \omega_1^2 + m_{III} \tau_3^2 \omega_1^2 \right] \quad (3)$$

где j<sub>e1</sub>, j<sub>e2</sub>, j<sub>d</sub>, j<sub>s</sub>, j<sub>c</sub> – моменты инерции относительно

своих осей стеблепротягивающих вальцов e<sub>1</sub> и e<sub>2</sub>, гладкого барабана d, барабана δ, вальца b с сателлитным колесом C соответственно, кг·м<sup>2</sup>;

n – количество вальцов, шт.;

m<sub>b</sub> – масса вальца совместно с сателлитным колесом, кг;

m<sub>f1</sub> и m<sub>f2</sub> – массы правой f<sub>1</sub> и левой f<sub>2</sub> стеблеподающих цепей, кг;

τ<sub>o</sub> – радиус начальной окружности привода звездочки цепей, м;

m<sub>I</sub>, m<sub>II</sub> и m<sub>III</sub> – массы приводных цепей I, II, III соответственно, кг.

Подставив выражения (1) и (2) в (3), после преобразования получим:

$$T = \frac{1}{2} J_\varepsilon \omega_1^2,$$

где J<sub>ε</sub> – приведенный к валу 1 момент инерции механизма, кг·м<sup>2</sup>:

$$J_\varepsilon = J_{e1} + J_{e2} + J_d (i_{21} i_{65})^2 + J_s i_{43}^2 + J_\delta i_{21}^2 + n J_b [i_{CS} i_{43} - i_{21} (1 + i_{CS})]^2 + n m_b^2 (\tau_c + \tau_s) i_{21}^2 + m_{f1} \tau_1^2 + m_{II} \tau_2^2 + m_{III} \tau_3^2 i_{21}^2 + (m_{f1} + m_{f2}) \tau_o^2. \quad (4)$$

Чтобы определить обобщенную силу системы, запишем сумму работ сил, действующих на рассматриваемую систему при повороте вала двигателя на элементарный угол δ<sub>A</sub>:

$$\delta_A = [M_1 \omega_1 - (M_e^c + M_e^x) \omega_1 - (M_b^c + M_b^x) \omega_c - (M_\delta^c + M_\delta^x) \omega_\delta - (M_d^c + M_d^x) \omega_d] \delta t,$$

где δ<sub>A</sub> – элементарный угол, град;

M<sub>1</sub>, M<sub>e</sub><sup>c</sup>, M<sub>e</sub><sup>x</sup>, M<sub>b</sub><sup>c</sup>, M<sub>b</sub><sup>x</sup>, M<sub>d</sub><sup>c</sup>, M<sub>d</sub><sup>x</sup> – моменты сил вальцов, Н·м.

Подставив в выражение элементарной работы сил значения угловых скоростей ω<sub>c</sub>, ω<sub>δ</sub>, ω<sub>d</sub> из выражения (1) и (2) и имея в виду, что δφ = ω<sub>1</sub> δt и Q = ΣδA/δφ, получим следующую формулу для обобщенной силы, Н:

$$Q = M_\varepsilon = M_1 - M_e^c - M_b^c [i_{CS} i_{43} - (1 + i_{CS}) i_{21}] - M_\delta^c i_{21} - M_d^c i_{21} i_{65} - M_e^x - M_b^x [i_{CS} i_{43} - (1 + i_{CS}) i_{21}] - M_\delta^x i_{21} - M_d^x i_{21} i_{65}. \quad (5)$$

Рассмотрим отдельно слагаемые, входящие в правую часть (5). Аналитическое выражение крутящего момента двигателя от угловой скорости можем записать линейной функцией:

$$M_1 = M_1^H \frac{\omega_x - \omega_1}{\omega_x - \omega^H}, \text{ или}$$

$$M_1 = M_1^H \frac{1}{\delta_q} - M_1^H \frac{1}{\delta_q} \frac{\omega_1}{\omega_1^x}, \quad (6)$$

где δ<sub>q</sub> = (ω<sub>1</sub><sup>x</sup> - ω<sub>1</sub><sup>H</sup>)/ω<sub>1</sub><sup>x</sup> – степень неравномерности вращения вала (потери угловых скоростей до и после обмолота).

Момент сил протягивания стеблей вальцами  $e$  (рис. 1) можем определить следующим образом:

$$M_e^c = 2mT_e\tau_e, \quad (7)$$

где  $T_e$  – сила трения вальцов по стеблям, Н;

$\tau_e$  – радиус вальца  $e$ , м;

$m$  – количество стеблей, находящихся в рабочей щели, шт.

Момент сил прокатывания стеблей планетарными вальцами состоит из двух слагаемых:

$$M_b^c = M_{b1}^c + M_{b2}^c,$$

где  $M_{b1}^c$  – момент сил, сообщающих скорость стеблевой массе, Н·м;

$M_{b2}^c$  – момент сил, деформирующих стебли при прокатке последних вальцами (патент №2197813 С2, 2003), Н·м:

$$M_{b1}^c = \frac{q^1}{q} \tau_c^2 \omega_b = \beta_c (i_{CS} i_{43} - (1 + i_{CS}) i_{21}) \omega; \quad (8)$$

$$M_{b2}^c = mF_{тр} \tau_c = mfn\tau_c; \quad (9)$$

$$\beta_c = \frac{q^1}{q} \tau_c^2,$$

где  $q^1$  – подача стеблей к аппарату, кг/с;

$q$  – масса одного початка, кг.

$F_{тр}$  – сила трения проката стеблей, Н;

$N$  – сила давления вальца планетарного аппарата на стебель, Н.

Момент сил протягивания стеблей гладким барабаном равен:

$$M_d^c = M_{d1}^c + M_{d2}^c; \quad (10)$$

$$M_{d1}^c = \frac{q^1}{q} \tau_d^2 \omega_d = \beta_d i_{21} i_{65} \omega;$$

$$M_d = mT_d \tau_d. \quad (11)$$

Момент сил отбрасывания початков планетарным барабаном составляет:

$$M_\delta^c = \mu M \frac{q^1}{q} \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right)^2 \tau_\delta^2 \omega_\delta, \quad (12)$$

где  $\mu$  – количество початков на стеблях, шт.;

$\lambda = (\tau_\delta \omega_\delta) / V_C = 0,5 \dots 0,6$ , (величина безразмерная);

$V_C$  – скорость движения стеблей в рабочей щели,

$V_C = \tau_0 \omega_1$ , м/с.

Имея выражения кинетической энергии и обобщенной силы системы, пользуясь методом Лагранжа, составим дифференциальное уравнение движения системы:

$$J_e \frac{d\omega}{dt} = M_e, \quad (13)$$

где  $J_e$  и  $M_e$  определяются выражениями (4) и (5).

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** Рассмотрим режимы работы кукурузоуборочного комбайна.

1. Запуск аппарата на холостом ходу, без нагрузки. В этом случае в выражении обобщенной силы мо-

мент сил сопротивления равен нулю и дифференциальное уравнение движения имеет вид [12, 13]:

$$J_e \frac{d\omega}{dt} = M_{дв} - M_{хх}. \quad (14)$$

Начальная угловая скорость при  $t = 0$  и  $\omega = 0$  также равна нулю.

2. Запуск аппарата с нагрузкой. Для этого режима имеем уравнение:

$$J_e \frac{d\omega}{dt} = M_{дв} - M_{хх} - M_C. \quad (15)$$

Начальное условие:  $t = 0, \omega = 0$ .

3. Подача стеблей после запуска аппарата. В этом случае начальная угловая скорость равна угловой скорости холостого хода. Имеем дифференциальное уравнение:

$$J_e \frac{d\omega}{dt} = M_{дв} - M_{хх} - M_C. \quad (16)$$

Начальное условие:  $t = 0, \omega = 0$ .

4. Внезапное прекращение подачи стеблей. В этом случае момент сил сопротивления равен нулю, а начальная угловая скорость равна угловой скорости установившегося движения:

$$J_e \frac{d\omega}{dt} = M_{дв} - M_{хх}. \quad (17)$$

Начальное условие:  $t = 0, \omega = 0$ .

Для всех режимов работы аппарата в правых частях дифференциальных уравнений движения можем выделить слагаемые, содержащие угловую скорость и свободные члены. Тогда выражения (14)-(17) будут приведены к уравнению вида:

$$J_e \frac{d\omega}{dt} = b_k \omega + B_k, \quad (18)$$

где  $B_k$  и  $b_k$  имеют различные числовые значения для различных режимов работы аппарата.

Разделив все члены уравнения (18) на  $J_e$  и обозначив  $\frac{b_k}{J_e} = a_k, \frac{B_k}{J_e} = A_k$ , получим:

$$\frac{d\omega}{dt} = a_k \omega + A_k. \quad (19)$$

Запишем общий интеграл уравнения (19):

$$\frac{1}{a_k} \ln |a_k \omega + A_k| = t + C_K, \quad (20)$$

где  $C_K$  – произвольные постоянные, имеющие безразмерные величины.

Для режимов запуска аппарата вхолостую и с нагрузкой имеем нулевые начальные условия. Используя их, определим произвольные постоянные:

$$C_K = \frac{1}{a_k} \ln |A_k|. \quad (21)$$

Из выражений (20) и (21) получаем так называемые скоростные характеристики, то есть зависимости угловой скорости от времени:

$$\omega = \frac{1}{a_k A_k} e^{a_k t} - \frac{A_k}{a_k}. \quad (22)$$

Аналогично получаем скоростные характеристики



ки для III и IV режимов:

$$\omega = \frac{1}{a_k} \left[ (a_k \omega^x + A) e^{a_k t} - A \right]; \quad (23)$$

Выбор оптимального приведенного момента инерции – важная задача динамических расчетов, так как распределение масс влияет на развитие динамических процессов. Коэффициент неравномерности хода машин равен:

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_{\text{ср}}}. \quad (24)$$

Имея скоростную характеристику рассматриваемого режима, можно найти  $\omega_{\max}$ ,  $\omega_{\min}$  и  $\omega_{\text{ср}}$ . Подставив найденные выражения в (24) и решив полученное выражение относительно  $J_e$ , получим формулу для определения величин постоянных маховых масс при заданном коэффициенте неравномерности хода.

В предыдущих рассуждениях мы считали звенья рассматриваемой системы абсолютно жесткими. В действительности карданный вал обладает упругими свойствами, и при передаче крутящего момента в нем, кроме основного движения, возникает и колебательное. Образуются дополнительные динамические нагрузки, величина которых может быть значительна, особенно для режима разгона [14, 15].

С учетом жесткости передачи рассматриваемую систему можно заменить двухмассовой системой (рис. 2)

Запишем дифференциальные уравнения движения для системы:

$$\begin{aligned} J_1 \ddot{\varphi}_1 + C(\varphi_1 - \varphi_2) &= 0; \\ J_2 \ddot{\varphi}_2 - C(\varphi_1 - \varphi_2) &= M, \end{aligned} \quad (25)$$

где  $M = M_2 - M_1 - b$ .

Полагая, что  $\varphi_1 - \varphi_2 = \varphi$ , получим:

$$\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2 = \dot{\varphi}; \quad \ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2 = \ddot{\varphi}.$$

Система (25) принимает вид:

$$\begin{aligned} J_1 (\ddot{\varphi} + \varphi_2) + C\varphi &= 0; \\ J_2 \ddot{\varphi}_2 - C\varphi &= b. \end{aligned} \quad (26)$$

Из второго уравнения системы (26) имеем:

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{1}{C} (J_2 \ddot{\varphi}_2 - b\varphi_2 - B), \\ \text{поэтому} \\ \dot{\varphi} &= \frac{1}{C} (J_2 \ddot{\varphi}_2 - b\dot{\varphi}_2); \quad \ddot{\varphi} = \frac{1}{C} (J_2 \ddot{\varphi}_2 - b\ddot{\varphi}_2). \end{aligned} \quad (27)$$

Пусть  $\tau_1 = 0$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$ ,  $\tau_4$  – корни характеристического уравнения:

$$\frac{J_1 J_2}{C} \tau_4 - \frac{b J_1}{C} \tau_3 + (J_1 + J_2) \tau_2 - b \tau = 0.$$

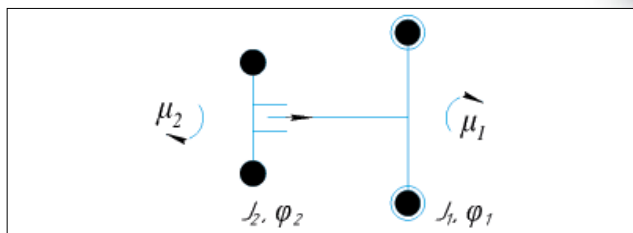


Рис. 2. Расчетная схема двухмассовой системы:  $J_1$  – момент инерции системы роторов, приведенный к валу двигателя;  $J_2$  – момент инерции ротора двигателя;  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  – текущие угловые отклонения;  $\mu_1$  – приведенный момент сопротивления;  $\mu_2$  – крутящий момент

Fig. 2. Design diagram of a two-mass system:  $J_1$  – inertia moment of the rotor system, reduced to the motor shaft;  $J_2$  – inertia moment of the rotor system;  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  – current angular deviations;  $\mu_1$  – reduced resistance moment;  $\mu_2$  – torque

Тогда общее решение выражения (27) имеет вид:

$$\varphi_2 = \frac{-B}{b} t + C_1 + C_2 e^{\tau_2 t} + C_3 e^{\tau_3 t} + C_4 e^{\tau_4 t}. \quad (28)$$

Определив  $\dot{\varphi}_2$  и  $\ddot{\varphi}_2$ , из второго уравнения системы (26), находим:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{B}{b} t + C_1 + \left( C_2 - \frac{b C_2 \tau_2}{C} + \frac{J_2 C_2 \tau_2^2}{C} \right) e^{\tau_2 t} + \\ &+ \left( C_3 - \frac{b C_3 \tau_3}{C} + \frac{J_3 C_3 \tau_3^2}{C} \right) e^{\tau_3 t} + \\ &+ \left( C_4 - \frac{b C_4 \tau_4}{C} + \frac{J_4 C_4 \tau_4^2}{C} \right) e^{\tau_4 t}. \end{aligned} \quad (29)$$

Постоянные интегрирования можно определить из начальных условий движения.

Упругий момент, возникающий в передаче, равен:

$$M = C(\varphi_1 - \varphi_2),$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  определяются выражениями (28) и (29).

Лабораторные исследования показали, что початкоотделяющий аппарат проявил наибольший эффект при угловой скорости барабана в пределах 52,1–62,2 рад/с.

**Выводы.** Предлагаемую методику можно использовать при динамических расчетах планетарных рабочих органов сельскохозяйственных машин. В результате теоретических исследований на кукурузоуборочном комбайне получили дифференциальные уравнения планетарного початкоотделяющего аппарата: запуска аппарата на холостом ходу

$$J_e(d\omega/dt) = M_{\text{дв}} - M_{\text{хх}};$$

запуска аппарата с нагрузкой

$$J_e(d\omega/dt) = M_{\text{дв}} - M_{\text{хх}} - M_C;$$

подачи стеблей после запуска аппарата

$$J_e(d\omega/dt) = M_{\text{дв}} - M_{\text{хх}} - M_C;$$

внезапного прекращения подачи

$$J_e(d\omega/dt) = M_{\text{дв}} - M_{\text{хх}}.$$

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Давыдова С.А., Вахания В.И., Курасов В.С. Анализ состояния и перспективные направления развития селекции и семеноводства кукурузы. М.: Росинформагротех. 2019. 92 с.
2. Трубилин Е.И., Сапрыкин В.Ю., Труфляк Е.В. Однорядный кукурузоуборочный комбайн для уборки початков сахарной кукурузы // *Техника и оборудование для села*. 2013. N8. С. 26-28.
3. Труфляк Е.В., Трубилин Е.И., Маслов Г.Г. Конструктивно-технологические усовершенствования кукурузоуборочного агрегата // *Тракторы и сельхозмашины*. 2011. N1. С. 8-10.
4. Труфляк Е.В. Приспособление к початкоотделяющему аппарату для уборки кукурузы // *Техника в сельском хозяйстве*. 2010. N4. С. 36-37.
5. Чаплыгин М.Е. Уборка кукурузы на зерно различными жатками // *Сельский механизатор*. 2015. N12. С. 8-9.
6. Чаплыгин М.Е., Белик М.А. Качество измельчения и распределения листостебельной массы при уборке кукурузы на зерно // *Техника и оборудование для села*. 2014. N2. С. 27-29.
7. Давыдова С.А., Чаплыгин М.Е. Техническая оснащённость селекции и семеноводства кукурузы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N3. С. 66-74.
8. Труфляк Е.В., Трубилин Е.И., Маслов Г.Г. Модернизация кукурузоуборочного агрегата // *Техника и оборудование для села*. 2010. N10. С. 17-19.
9. Серга Г.В., Серга М.Г., Тульчий В.И. Разработка и исследование конструкции кукурузоуборочного комбайна со стреловидной рамой // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2016. N121. С. 322-335.
10. Bakharev D., Pastukhov A., Volvak S., Sharaya O. Substantiation of deck parameters of rotary threshing device. *Engineering for Rural Development*. 2019. N18. 481-486.
11. Курасов В.В., Погосян В.В., Плешаков В.Н., Самурганов Е.Е. Исследование движения кукурузного початка в вальцово-молотилке // *Труды Кубанского Государственного Аграрного Университета*. 2017. N69. С. 315 – 318.
12. Astaf V.L.Y. Golikov V.A., Zhalnin E.V., Pavlov S.A., Pekhalskiy I.A. Strategy of technical support of grain harvesting operations in republic of Kazakhstan. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020. Vol. 51. N3. 46-51.
13. Amankulov Y., Petunina I., Lobanova N. Three-dimensional setup of composite materials as a way to achieve high mechanical properties. *Periodico Tche Quimica*. 2020. Vol. 17. N36. 431-456.
14. Петунина И.А., Короткин А.В., Курасов В.С., Плешаков В.Н. Расчет параметров установки для очистки початков семенной кукурузы // *Сельский механизатор*. 2018. N10. С. 10-11.
15. Byshov D.N., Petunina I.A., Kotelevskaya E.A., Borychev S.N., Rembalovich G.K. Substantiation of technical and operational characteristics of the device to sort corn cobs. BIO Web of Conferences. International Scientific-Practical Conference "Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources" (FIES 2019). 2020. Vol. 17. 00094.

### REFERENCES

1. Davydova S.A., Vakhaniya V.I., Kurasov V.S. Analiz sostoyaniya i perspektivnye napravleniya razvitiya selektsii i semenovodstva kukuruzy [Analysis of the state and prospective directions of maize selection and seed production development]. Moscow: Rosinformagrotekh. 2019. 92 (In Russian).
2. Trubilin E.I., Saprykin V.Yu., Truflyak E.V. Odnoryadnyy kukuruzoborochnyy kombayn dlya uborki pochatkov sakhar-noy kukuruzy [Single-row corn harvester for harvesting sweet corn cobs]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2013. N8. 26-28 (In Russian).
3. Truflyak E.V., Trubilin E.I., Maslov G.G. Konstruktsionno-tekhnologicheskie usovershenstvovaniya kukuruzoboroch-nogo agregata [Structural and technological improvements of the corn harvester]. *Traktory i sel'khomashiny*. 2011. N1. 8-10 (In Russian).
4. Truflyak E.V. Prispособlenie k pochatkootdelyayushchemu apparatu dlya uborki kukuruzy [Cob separating device for corn harvesting]. *Tekhnika v sel'skom hozyaystve*. 2010. N4. 36-37 (In Russian).
5. Chaplygin M.E. Uborka kukuruzy na zerno razlichnymi zhatkami [Operating-technological indexes of combines Don-1500B on cleaning up of corn on grain]. *Sel'skiy mekhanizator*. 2015. N12. 8-9 (In Russian).
6. Chaplygin M.E., Belik M.A. Kachestvo izmel'cheniya i raspredeleniya listostebel'noy massy pri uborke kukuruzy na zerno [Shredding and distribution quality of leafy mass when harvesting corn for grain]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2014. N2. 27-29 (In Russian).
7. Davydova S.A., Chaplygin M.E. Tekhnicheskaya osnashchennost' selektsii i semenovodstva kukuruzy [Technical equipment of corn breeding and seed production]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N3. 66-74 (In Russian).
8. Truflyak E.V., Trubilin E.I., Maslov G.G. Modernizatsiya kukuruzoboroch-nogo agregata [Corn harvesting unit modernization]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2010. N10. 17-19 (In Russian).
9. Serga G.V., Serga M.G., Tul'chiy V.I. Razrabotka i issledovanie konstruktsii kukuruzoboroch-nogo kombayna so strelovidnoy ramoy [Development and research of a corn harvester with sweep frame design]. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2016. N121. 322-335 (In Russian).
10. Bakharev D., Pastukhov A., Volvak S., Sharaya O. Substantiation of deck parameters of rotary threshing device. *Engineering for Rural Development*. 2019. N18. 481-486 (In English).

11. Kurasov V.V., Pogosyan V.V., Pleshakov V.N., Samurganov E.E. Issledovanie dvizheniya kukuruznogo pochatka v val'tsovoy molotilke [Research of corn-cob motion in roller thresher]. *Trudy Kubanskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2017. N69. 315-318 (In Russian).

12. Astaf V.L.Y., Golikov V.A., Zhalnin E.V., Pavlov S.A., Pekhalskiy I.A. Strategy of technical support of grain harvesting operations in republic of Kazakhstan. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020. Vol. 51. N3. 46-51 (In English).

13. Amankulov Y., Petunina I., Lobanova N. Three-dimensional setup of composite materials as a way to achieve high mechanical properties. *Periodico Tch Quimica*. 2020. Vol. 17. N36. 431-456 (In English).

14. Petunina I.A., Korotkin A.V., Kurasov V.S., Pleshakov V.N. Raschet parametrov ustanovki dlya ochistki pochatkov semennoy kukuruzy [Calculation of parameters of the installation for cleaning the corn COBS]. *Sel'skiy mekhanizator*. 2018. N10. 10-11 (In Russian).

15. Byshov D.N., Petunina I.A., Kotelevskaya E.A., Borychev S.N., Rembalovich G.K. Substantiation of technical and operational characteristics of the device to sort corn cobs. *BIO Web of Conferences. International Scientific-Practical Conference "Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources" (FIES 2019)*. 2020. Vol. 17. 00094 (In English).

### Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

### Заявленный вклад соавторов:

Погосян В.М. – научное руководство, формулирование основных целей и задач исследования, разработка теоретических предпосылок, доработка текста, формирование общих выводов.

Чаплыгин М.Е. – анализ тенденций развития существующих кукурузоуборочных комбайнов, формирование частных выводов, обработка результатов исследований, визуализация, редактирование рукописи статьи и литературный анализ.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Coauthors' contribution:

Pogosyan V.M. – scientific leadership, formulation of the research main goals and objectives, development of theoretical premises, revision of the text, formation of general conclusions.

Chaplygin M.E. – analysis of existing corn harvester development trends, formulation of private conclusions, processing of the research results, visualization, the editing of the article manuscript and literary analysis.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию  
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on  
The paper was accepted for publication on

06.07.2021  
27.08.2021